

# ANALIZA CALITATIV-CANTITATIVĂ A ZGOMOTULUI PROPRIU AL FILTRELOR ACTIVE RC ÎN PRINCIPALELE SCHEME PRACTICE DE REALIZARE: *SALLEN-KEY*, *TEYLOR* ȘI *RAUKH*

GUȚU Valentin

Technical University of Moldova, e-mail: valentegut@gmail.com

*Abstract* - Lucrarea este dedicată analizei rezultatelor metodei de calcul și a măsurărilor experimentale a zgomotului propriu al dispozitivelor și echipamentelor electronice de selecție a semnalelor prin frecvență – filtrele active RC, schemele *Sallen-Key*, *Taylor* și *Raukh*. Aceste scheme de realizare permit obținerea funcțiilor de transfer trece-sus (FTS), trece-jos (FTJ) și trece-bandă (FTB). Sunt prezentate și analizate rezultatele calculelor teoretice și a măsurărilor experimentale a zgomotului propriu al elementelor filtrelor active – amplificatoarelor operaționale, este studiată influența componentelor pasive și a factorului de calitate ale unui etaj de filtrare de ordinul doi în schemele menționate. Analiza confirmă posibilitatea utilizării practice a metodei de calcul și de măsurare a densității spectrale a zgomotului propriu și permite elaborarea unor recomandări principial noi pentru asamblarea filtrelor active RC, cu nivel scăzut de zgomot.

## 1. INTRODUCERE

Analiza efectuată în actuala lucrare urmărește două scopuri: a) evaluarea gradului de exactitate a metodicii de calcul a zgomotului propriu al filtrelor active RC în varianta constructivă a tehnologiei integrate; b) aprecierea exactității măsurărilor zgomotului propriu al diferitor dispozitive aparte (a amplificatoarelor operaționale, AO) și a filtrelor active RC (FA-RC), în ansamblu.

În conformitate cu aceste scopuri, în lucrare sunt prezentate rezultatele investigațiilor și măsurărilor experimentale ale caracteristicilor de zgomot ale unor amplificatoare operaționale, așa ca: KP544YД1 (analog american  $\mu A741$ ), KP140YД1208 ( $\mu A776$ ), K553YД2 (LM101) și AO NSZ (nivel scăzut de zgomot) sub denumirea codificată „Radical”. Sunt prezentate de asemenea rezultatele analizei caracteristicilor experimentale ce oglindesc proprietățile de zgomot ale celor mai frecvent utilizate în practică scheme de realizare a FA-RC. În baza calculelor și analizei efectuate, la fel ca și a investigațiilor și măsurărilor experimentale în lucrare sunt concretizate și formulate un șir de sfaturi și recomandări pentru construirea echipamentelor de selecție a semnalelor prin frecvență cu nivel scăzut de zgomot.

## 2. ANALIZA CARACTERISTICILOR DE ZGOMOT ALE UNOR AMPLIFICATOARE OPERAȚIONALE

Foaia tehnică (sau pașaportul tehnic) a amplificatoarelor operaționale moderne conține zeci de parametri și caracteristici diferite. Dar nici până în prezent, printre aceste date tehnice ale AO nu se pot întâlni informații despre proprietățile de zgomot ale acestor dispozitive. În diverse publicații de până în anul 2000, la fel ca și în cele de după întâlnim informații despre proprietățile de zgomot ale elementelor (tranzistoarelor, bipolare și cu efect de câmp) și dispozitivelor ce le conțin – amplificatoarele operaționale în primul rând. De exemplu, în lucrarea [2] sunt prezentate caracteristicile de zgomot ale unui șir de tranzistoare (figura 1), în varianta densității spectrale a curentului de zgomot,  $i_z$ . În aceeași sursă pot fi găsite și caracteristici anologice ale AO sau a unor părți componente ale acestora, cum ar fi amplificatoarele (etajele) diferențiale sau cele cu buclă de reacție. Utilizarea AO în serii mai scoate în evidență noi cerințe, tot mai aspre și peremptorii, în privința elaborării și construirii schemelor cu parametri performanți, cu un nivel tot mai scăzut de zgomot propriu. Nivelul foarte jos al multor semnale care trebuie să fie captate, prelucrate și deseori – măsurate, în foarte multe cazuri practice se află la limita zgomotului propriu al elementelor active ale dispozitivelor și aparatelor utilizate. În calitatea de exemplu am putea aminti aici de miile de fotografii ale planetei Jupiter și datele telemetrice, transmise de la distanțe enorme (cosmice!) de peste 100 mln kilometri, de către radiotelescopul spațial Hubbel. Semnale la fel de slabe întâlnim într-o mulțime de sfere ale științei și tehnicii ingineresti și pe bătrâna noastră planetă. Și în toate

cazurile este stringentă nevoie de metode de calcul și mijloace tehnice performante pentru măsurarea zgomotului, cu suficientă și garantată exactitate. Rezultatele măsurărilor experimentale realizate în această lucrare urmăresc scopul să completeze informația și cunoștințele despre proprietățile de zgomot ale amplificatoarelor operaționale, prezentate în lucrarea [3] și în așa mod să contribuie la o mai profundă percepere, evaluare și, în final – diminuare a nivelului zgomotului propriu al FA-RC. În urma studierii atente a celor mai cunoscute metode destinate măsurării caracteristicilor de zgomot (în particular – a densității spectrale), a avantajelor și părților negative ale acestor metode este argumentată alegerea metodei de măsurare prin modulație. Această metodă, asigurând suficientă precizie și sensibilitate rezonabilă, permite concomitent și o protecție contra perturbațiilor ce vin din rețeaua de alimentare cu energie (50 Hz). Cele menționate mai sus pot fi confirmate, examinând rezultatele măsuririlor densității spectrale ale zgomotului  $S(f)$  prin metoda de modulație și metoda directă, la ieșirea amplificatorului operațional KP544YД1. Analiza caracteristicilor obținute (figura 2) arată în mod clar că nivelul densității spectrale a zgomotului este mai înalt în cazul metodei directe de măsurare (curba 1), în medie de 1,5 – 2 ori, decât în cazul metodei de modulație (curba 2). Afară de aceasta, la frecvența 50 Hz caracteristica  $S(f)$  - curba 1, suportă un salt care evidenția-

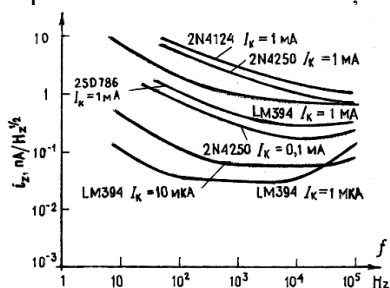


Fig. 1. Densitatea spectrală a curentului de zgomot funcție de curentul de colector a unor tranzistoare.

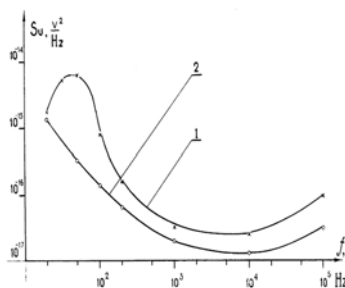


Fig. 2. Caracteristicile  $S(f)$  ale AO obținute prin metoda directă (1) și metoda modulației (2) de măsurare.

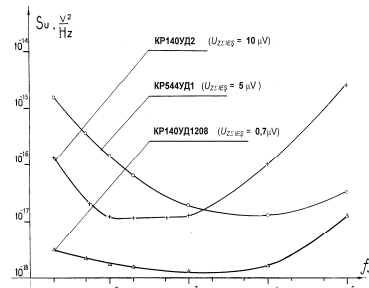


Fig. 3. Densitatea spectrală a zgomotului diferitor amplificatoare operaționale.

ză influența rețelei de alimentare asupra rezultatelor măsurării prin metoda directă; această influență duce la creșterea densității spectrale a zgomotului cam cu 1,5 ordine de mărime. Prin urmare, în metoda directă apare o eroare suplimentară de măsurare de 45 – 50 %, iar la frecvența 50 Hz această eroare poate atinge și 150 %. Măsurările în cauză s-au efectuat pentru partide de câte 25 – 30 de exemplare de amplificatoare operaționale KP140YД2 („Istoc”), KP544YД1 („Regata”), și câte 5 exemplare de amplificatoare operaționale KP140YД1208 („Radical”) cu nivel scăzut de zgomot (analog  $\mu A779$ ). Rezultatele acestor măsurări sunt prezentate în figura 3. Analiza lor permite stabilirea particularităților de zgomot ale amplificatoarelor operaționale de fiecare tip. Amplificatorul operațional KP544YД1 („Regata”) posedă un nivel mai înalt de zgomot de frecvență joasă (*flicker*), ceea ce se datorează, presupunem particularităților tehnologice de construire ale acestui circuit integrat: concentrației inițiale a purtătorilor de sarcină în materialul plăcii de siliciu; distribuției și concentrației defectelor materialului semiconductor (dislocații, defecte de împachetare, calitatea stratului de bioxid de siliciu  $SiO_2$ , condițiilor și stării „hotarului”  $Si - SiO_2$ ). La frecvențe joase proprietățile de zgomot ale AO KP140YД2 („Istoc”) sunt de preferat:

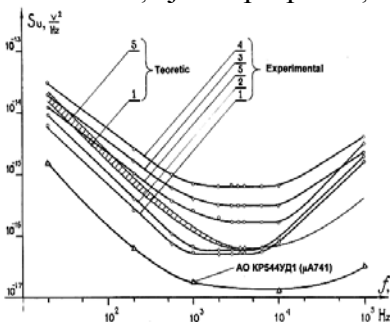


Fig. 4. Caracteristici teoretice și experimentale  $S_U(f)$  FTJ Sallen-Key.

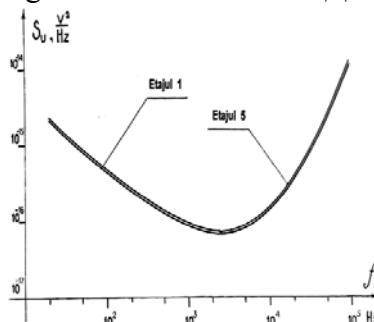


Fig. 5. Caracteristici  $S_U(f)$  FTJ Teylor.

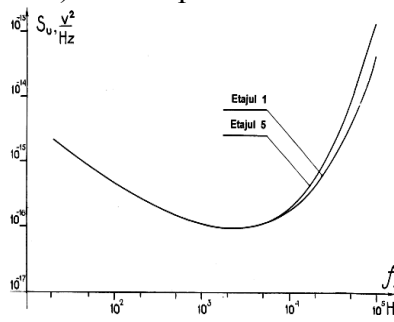


Fig. 6. Caracteristici  $S_U(f)$  FTJ Raukh.

la frecvența de 20 Hz densitatea spectrală a zgomotului este de aproximativ 10 ori mai mică, decât în cazul AO KP544YД1 („Regata”). La frecvențe mai înalte însă, tabloul se schimbă radical: densitatea spectrală a zgomotului AO KP140YД2 crește considerabil și deja la frecvența de 10 kHz depășește de 10 ori  $S(f)$  a amplificatorului KP544YД1. Aceasta se poate explica prin caracteristicile de frecvență diferite ale acestor AO; izolarea componentelor integrate la AO KP140YД2 se realizează cu ajutorul joncțiunii *pn* polarizate invers [4], iar la AO KP544YД1 aceasta se face prin amplasarea respectivelor componente în așa-numitele „buzunare” – un volum de semiconductor, izolat de restul volumului plăcii cu un satrat izolant de  $SiO_2$ . Astfel se obțin caracteristici de frecvență mai bune, dar procesul tehnologic este mai complicat și mai costisitor.

Ca rezultat, în diapazonul de frecvențe 20 Hz ÷ 100 kHz tensiunea efectivă sumară a zgomotului la ieșirea AO KP544YД1 este  $U_{ZZIES} = 5 \mu V$ , iar la ieșirea lui KP140YД2  $U_{ZZIES} = 10 \mu V$ , *id est* de două ori mai mare. Aceasta, împreună cu alte priorități funcționale caracteristice AO KP544YД1 (stabilitate înaltă a coeficientului de transfer, un *drift* și deviere mică de 0, corecție simplă, rezistență și stabilitate) s-au dovedit hotărâtoare și determinante în alegerea acestui tip de amplificator ca element activ al FA-RC. Din analiza aceluiași caracteristici urmează că cele mai puțin „zgomotoase” sunt AO KP140YД 1208 („Radical”). Datele experimentale obținute în această lucrare se află în deplină concordanță cu premisele teoretice din [2], în conformitate cu care o diminuare considerabilă a zgomotului tranzistoarelor planare este reală și posibilă, în regim de funcționare la curenți cât mai mici, de ordinul microamperilor ( $I_E \leq 10 \mu A$ ). În cazul acestor AO  $U_{ZZIES} = 0,7 \mu V$ , deci din punctul de vedere al proprietăților de zgomot aceste amplificatoare sunt de preferat. Se poate presupune că tocmai aici există anumite posibilități reale și că este de așteptat, ca aceste AO să devină componente de perspectivă ale filtrelor active RC, cu nivel foarte scăzut de zgomot.

### 3. RECOMANDAȚII INGINEREȘTI ÎN CONSTRUCȚIA ECHIPAMENTELOR CU NIVEL SCĂZUT DE ZGOMOT

În lucrările [6], [7] și altele a fost efectuată o analiză detaliată a rezultatelor teoretice și experimentale de studiere a proprietăților de zgomot ale diferitor scheme de realizare ale FA-RC. Pe baza rezultatelor obținute și a concluziilor trase este posibilă elaborarea unei serii de recomandări practice, care ar contribui la proiectarea și construirea filtrelor active RC cu nivel scăzut de zgomot propriu, pe larg utilizate pentru selectarea semnalelor prin frecvență în cele mai diverse sfere: telecomunicații (comprimarea și decomprimarea canalelor de legătură), radiotehnică și TV, astronomie și legături cosmice la distanțe enorme și multe-multe alte domenii colaterale.

#### 3.1. REALIZAREA FILTRELOR TRECE-JOS (FTJ)

Analizei proprietăților de zgomot continuă să fie supuse trei scheme de realizare a FTJ, cel mai frecvent utilizate în practică: *Sallen-Key* ( $K_0 > 0$ ); *Taylor* ( $K_0 < 0$ , o singură buclă de reacție); *Raukh* ( $K_0 < 0$ , buclă de reacție multiplă); aici  $K_0$  este coeficientul de transfer al AO.

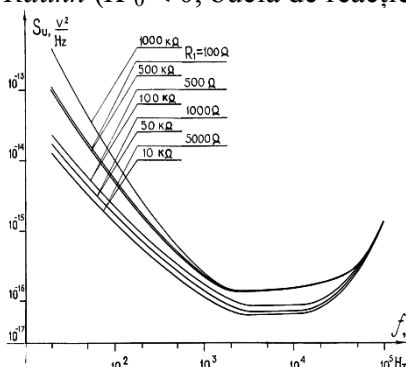


Fig. 7. Caracteristici  $S_U(f)$  și  $R_1 = \text{var}$  (FTJ Sallen-Key;  $K_0 > 0$ ,  $f_i = 3,4 \text{ kHz}$ ,  $U_{ZZies} = 15 \mu V$ ).

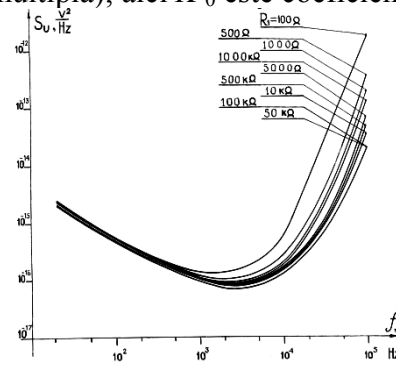


Fig. 8. Caracteristici  $S_U(f)$  și  $R_1 = \text{var}$  (FTJ Taylor,  $K_0 < 0$ ,  $f_i = 3,4 \text{ kHz}$ ,  $U_{ZZies} = 23 \mu V$ ).

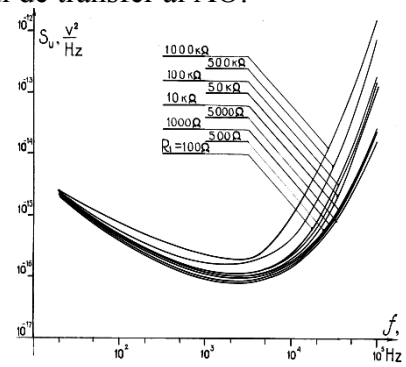


Fig. 9. Caracteristici  $S_U(f)$  și  $R_1 = \text{var}$  (FTJ Raukh,  $K_0 < 0$ ,  $f_i = 4,4 \text{ kHz}$ ,  $U_{ZZies} = 15 \mu V$ ).

Așadar:

1. Comparația densității spectrale a zgomotului la ieșirea unui etaj FTJ *Sallen-Key*, *Taylor* și *Raukh* permite stabilirea deosebirilor cantitative și, principalul – calitative ale acestor scheme de realizare a filtrelor trece-jos. FTJ *Sallen-Key* (figura 4) posedă un nivel mai înalt de zgomot *flicker* (aproximativ de 10 ori mai înalt la 20 Hz) decât FTJ *Taylor* (figura 5) și *Raukh* (figura 6).

– Afară de aceasta, dacă modificarea elementelor pasive *RC* ale FTJ *Sallen-Key* provoacă o modificare a zgomotului *flicker* la 20 Hz cu 1,5 ordin de mărime, în schemele *Taylor* și *Raukh* modificările analoage nu influențează în general zgomotul *flicker* la aceeași frecvență (figurile 7, 8, 9). Totodată, din comparația figurilor 4, 5, 6 și 7, 8, 9 se vede clar că FTJ *Taylor* și *Raukh* posedă un nivel de zgomot considerabil la frecvențe mai înalte; așa, la frecvența de 100 kHz densitatea spectrală a zgomotului FTJ *Sallen-Key* este  $S_U = 6 \cdot 10^{-16} \text{ V}^2 / \text{Hz}$ , *Taylor* –  $S_U = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ V}^2 / \text{Hz}$ , *Raukh* –  $S_U = 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ V}^2 / \text{Hz}$ . Prin urmare, efectuând o alegere a schemei FTJ și dorind minimizarea zgomotului propriu al acestuia, în practică este rezonabil să se țină cont de următoarele considerente:

– pentru asigurarea unui nivel scăzut de zgomot în banda de trecere FTJ este indicată utilizarea etajelor de ordinul 2 *Raukh* și *Taylor*;

– dacă este necesar un nivel mai mic de zgomot în afara BT (benzii de trecere), atunci este justificată utilizarea etajelor de ordinul 2 *Sallen-Key*.

2. Din comparația curbelor prezentate în figurile 4, 5 și 6 se poate stabili de asemenea că influența factorului de calitate asupra densității spectrale a zgomotului cel mai puțin se resimte în cazul FTJ *Raukh*, ceva mai mult – în cazul FTJ *Sallen-Key*; FTJ *Taylor* din acest punct de vedere ocupă o poziție de mijloc.

3. Pentru a micșora nivelul de zgomot propriu la ieșirea filtrului FTJ este de preferat ca etajele de ordinul 2 ce-l alcătuiesc să posedă un factor *Q* mai mic; în cazul utilizării etajelor de ordinul 2 de calitate diferită, etajele cu factorul de calitate mai înalt se conectează primele, cu factorul *Q* mai mic – ultimele. Așa se reușește micșorarea tensiunii efective sumare de ieșire a zgomotului de două și mai multe ori (figurile 4, 5, 6).

### 3.2. REALIZAREA FILTRELOR TRECE-SUS (FTS)

4. Din punct de vedere al zgomotului propriu etajul FTS în cazul celor trei variante de scheme de realizare sunt aproximativ de egală valoare (figurile 10, 11, 12). Așa, tensiunea efectivă sumară de zgomot la ieșirea etajului FTS: *Sallen-Key*,  $U_{ZZIEȘ} = 10 \mu\text{V}$ ; *Taylor*,  $U_{ZZIEȘ} = 13 \mu\text{V}$ ; *Raukh* –  $U_{ZZIEȘ} = 10 \mu\text{V}$ .

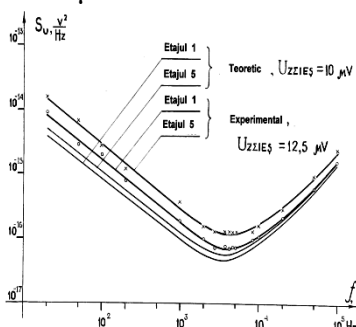


Fig. 10. Caracteristici  $S_U(f)$  și  $R_1 = \text{var}$  (FTS *Sallen-Key*,  $f_l = 4,4 \text{ kHz}$ ).

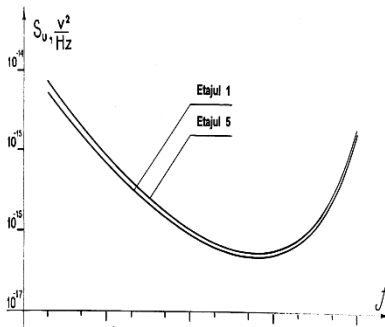


Fig. 11. Caracteristici  $S_U(f)$  FTS *Taylor*.

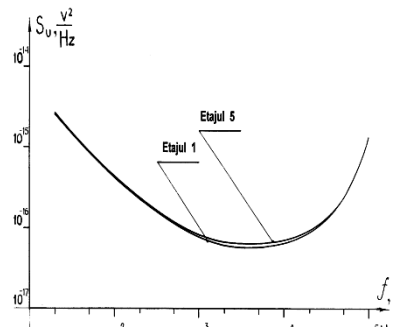


Fig. 12. Caracteristici  $S_U(f)$  FTS *Raukh*.

5. Densitatea spectrală a zgomotului la ieșirea unui etaj FTS cel mai puțin depinde de valorile elementelor pasive *RC* în cazul schemei *Raukh*; o influență ceva mai mare asupra  $S_U(f)$  are loc în cazul schemelor *Sallen-Key*, cu precădere la frecvențe joase; cu aproape 1 – 1,5 ordin de mărime se poate modifica  $S_U(f)$  la ieșirea etajului FTS *Taylor*. Dar nivelul minim al  $S_U(f)$  este aproximativ același în toate schemele, deși se obține acest minim pentru valori diferite ale elementelor de schemă

pasive: FTS *Sallen-Key* pentru  $R_1 = (5 \div 10) \text{ k}\Omega$ ; *Taylor* –  $R_1 = (50 \div 100) \text{ k}\Omega$ ; *Raukh* –  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  (figurile 7, 8, 9).

#### 4. CONCLUZII

Recomandările succint formulate mai sus s-au dovedit utile în practica elaborării filtrelor active RC cu nivel scăzut de zgomot propriu, utilizate ca dispozitive pentru selecția semnalelor prin frecvență. Rezultatele de bază ale acestei lucrări au fost implementate într-o serie de proiecte, din cadrul Institutului de Cercetări Științifice Micro Aparate (abreviația în limba rusă – НИИМП). Majoritatea rezultatelor și a recomandațiilor propuse au contribuit la crearea filtrelor active cu nivel redus de zgomot propriu, pentru instalații speciale de compresare și de decompresare a canalelor de legătură, cu un grad avansat de siguranță și fiabilitate. Unul dintre aceste blocuri, elaborat și construit în cadrul instituției menționate, a fost instalat la bordul aparatului de zbor personal al conducătorului statului sivietic. Au fost și alte destinații, nu mai puțin importante, dar care nici până în prezent nu au devenit cunoscute, nici cel puțin specialiștilor în materie (din cauza secretizării exagerate).

#### Bibliografie

- [1] Guțu V. *Filtre active RC. Monografie*. Editura „TEHNICA INFO”, Chișinău 2009.
- [2] Goroviț P, Hell W. *Arta schemotehnicii*. Editura „Mir”, Moscova 1998.
- [3] Geli P.P. *Studierea caracteristicilor de zgomot ale filtrelor active RC*. Teza de doctt.ș.t., IET Leningrad, 1973.
- [4] Guțu V. *Electronica. Dispozitive și circuite*. Editura „TEHNICA INFO”, Chișinău 2007.
- [5] Huilsman L. *Filtre active RC*. Editura „Mir”, Moscova 1968.
- [6] Guțu V. *Calculul zgomotului propriu al dispozitivelor și echipamentelor electronice (active RC filter, Sallen-Key's circuits)*. Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Conference on Electromech. and Pow. Sys., SIELMEN 2011.
- [7] Guțu V. *Calculation of Devices and Equipment Electronics Own Noise (active RC filter, Raukh's circuits)*. Buletin ADIR, ANUL XVI, nr.4, ELS 2011, Suceava România.